

О. Н. Гвоздева, А. А. Орлов*, А. С. Степушин, А. В. Шалин

Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет), г. Москва

*gon7133@mail.ru

Научный руководитель — проф., д-р техн. наук С. В. Сковорова

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СПЛАВЕ VT35 НА ЕГО СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА

В работе исследовано влияние содержания легирующих элементов в псевдо- β -сплаве VT35 на технологические и механические свойства при комнатной температуре. Установлено, что максимальная предельная степень сжатия при осадке ($\epsilon_{пр}$) достигается при содержании алюминия не более 3 %, основных β -стабилизаторов (V, Cr) и олова в пределах среднего и остальных элементов по минимальному уровню паспортного состава. Показано, что обеспечение правильного количественного содержания элементов в сплаве VT35 позволяет повысить $\epsilon_{пр}$ до 75–80 % в закаленном состоянии при $\sigma_b = 800$ МПа.

Ключевые слова: псевдо- β -титановые сплавы, легирование, деформация, технологическая пластичность, механические свойства, детали крепления.

O. N. Gvozdeva, A. A. Orlov, A. S. Stepushin, A. V. Shalin

THE INFLUENCE OF ALLOYING ELEMENTS ON MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF VT35 ALLOY

The influence of alloying elements on room-temperature technological and mechanical properties of pseudo- β alloy VT35 is investigated. It is shown that the maximum compression ratio (ϵ_{pr}) is reached in this alloy with aluminum amount is limited to 3 %, basic β -stabilizers (V, Cr) and scandium contents are close to their average contents and other elements are limited to minimal level. It is shown that the maintenance of the correct alloying elements content helps to increase maximum compression ratio (ϵ_{pr}) of VT35 alloy in quenched state to 75–80 % with breaking strength at 800 MPa levels.

Key words: pseudo- β -titanium alloys, alloying elements, technological toughness, mechanical properties, fixture elements.

Соединение различных элементов конструкции планера летательного аппарата производится с помощью разнообразных крепежных элементов (заклепки, болты). Эти изделия должны сочетать высокую удельную прочность, сопротивление коррозии и др. Со-

вокупности данных требований в наибольшей степени удовлетворяют высокопрочные титановые сплавы. Их химический и фазовый состав, структура должны обеспечивать, с одной стороны, возможность реализации экономичных технологий, основанных на холодной пластической деформации, а с другой — достижение заданного комплекса механических свойств в готовом изделии.

Данная работа является продолжением исследований, проводимых авторами [1, 2]. В работе [1] анализ взаимосвязи химического состава и свойств титановых сплавов показал, что лучшим комплексом свойств обладает сложнолегированный сплав ВТ35. Исследования, описанные в работе [2], по влиянию нейтральных упрочнителей циркония и олова на структуру и свойства $(\alpha+\beta)$ -сплава ВТ16 показали, что их введение в сплав в количестве около 1 мас. % практически не сказывается на технологической пластичности при повышенных температурах, но существенно снижает ее при комнатной температуре.

В данной работе проведена оценка влияния количественного содержания легирующих элементов в сплаве ВТ35 на его структуру, предельную степень сжатия при осадке и механические свойства при комнатной температуре.

Исследования проводили на горячекованных прутках трех составов сплава марки ВТ35, отличающихся содержанием основных легирующих элементов, но находящихся в пределах паспортного состава сплава (2—4 %Al, 14—16 %V, 2—4 %Cr, 2—4 %Sn, 0,5—2,0 %Mo, 0,5—2,0 %Zr, 0,01—0,4 %Nb). Состав 1 содержал до 3 % алюминия, среднее по паспорту количество ванадия, хрома и олова и минимально допустимое количество молибдена, циркония и ниобия. Молибденовый эквивалент сплава состава 1 составлял 15,1. Количество всех легирующих элементов состава 2 близко к верхнему допустимому пределу ($[\text{Mo}]_{\text{ЭКВ}}=19,4$). Состав 3 по процентному содержанию легирующих элементов ($[\text{Mo}]_{\text{ЭКВ}}=16,6$) занимает среднее положение между составом 1 и составом 2.

Проведенные металлографические исследования показали, что структура прутков в кованом состоянии представлена β -зернами и небольшим количеством глобулярных α -частиц. Это связано со скоростью охлаждения от температурковки, которая не обеспечивает подавления диффузии легирующих элементов и приводит к развитию $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения. Прутки перед дальнейшей обработкой подвергали закалке с температуры 800 °С, соответствующей β -области. Охлаждение проводили на воздухе, что для данного сплава соответствует охлаждению со скоростью выше первой критической, при которой подавляется диффузия основных легирующих элементов. Структура

прутков всех составов в закаленном состоянии идентична и представлена β -зернами.

Для определения технологической пластичности сплава ВТ35 проводили осадку образцов трех составов при комнатной температуре. Испытания останавливались при достижении максимального усилия установки или при появлении трещин.

Проведенные испытания показали, что самый высокий предел текучести ($\sigma_T = 1164$ МПа) и минимальная степень сжатия при осадке ($\epsilon_{пр} = 34\%$) у сплава ВТ35 состава 2. Это связано с его сильным твердорастворным упрочнением легирующими элементами. На боковой поверхности образца видна трещина с характерным смещением металла по линиям деформации под углом 45° (рис. 1, б). С уменьшением молибденового эквивалента сплава ВТ35 ($[Mo]_{\text{экв состав 2}} > [Mo]_{\text{экв состав 3}} > [Mo]_{\text{экв состав 1}}$), наблюдается снижение предела текучести и возрастание предельной степени сжатия. Самый низкий предел текучести ($\sigma_T = 1046$ МПа) и максимальная степень сжатия при осадки ($\epsilon_{пр} = 70\%$) достигаются у сплава ВТ35 состава 1 (рис. 1, а). Сплав ВТ35 состава 3 занимает промежуточное положение между составом 1 и 2 и обеспечивает предельную степень деформации 50% при пределе текучести 1088 МПа. Осаженный образец имеет бочкообразную форму с микротрещинами на боковой поверхности (рис. 1, в).



Рис. 1. Внешний вид образцов из сплава ВТ35 после испытаний на осадку при комнатной температуре:

а — состав 1; б — состав 2; в — состав 3

На основании анализа полученных результатов установлено, что лучшая технологическая пластичность сплава ВТ35 достигается при содержании не более 3% алюминия, в пределах среднего паспортного состава — основных β -стабилизаторов (ванадия и хрома) и олова и в минимальном количестве остальных легирующих элементов (молибдена, циркония и ниобия).

На следующем этапе работы была изготовлена опытная партия прутков из сплава ВТ35 состава 1. Технологическая схема изготовления прутков из сплава ВТ35 диаметром 18–9 мм включала ковку и последующую прокатку в β -области. С уменьшением диаметра заготовки температуры деформации постепенно снижали от 1060 до 850 °С.

Структура прутков из сплава ВТ35 после горячей прокатки представлена зернами β -фазы, размер которых зависит от температуры прокатки (рис. 2).

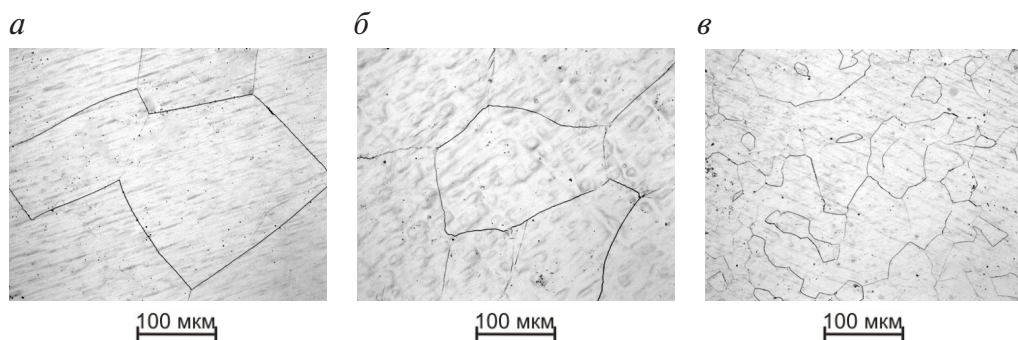


Рис. 2. Структура прутков из сплава ВТ35 состава 1 после охлаждения на воздухе с температуры 800 °С:

a — Ø18 мм; *б* — Ø12 мм; *в* — Ø9 мм

На заключительном этапе работы были определены технологические и механические свойства полученных опытных прутков сплава ВТ35. Анализ результатов механических испытаний показал, что все образцы в закаленном состоянии имеют высокую степень сжатия при осадке, значения которой были не ниже 78 %. Однако в закаленном состоянии сплав имеет достаточно низкий уровень прочности на растяжение ($\sigma_b \approx 790$ МПа) и напряжение среза ($\tau_{ср} \approx 575$ МПа).

Такой комплекс механических свойств, достигаемый на образцах из сплава ВТ35, позволит проводить пластическую деформацию при комнатной температуре, но не обеспечит необходимую прочность и напряжение среза в готовом изделии (увеличить возможно за счет проведения последующего старения).

Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Сравнительный анализ деформируемости псевдо- β -титановых сплавов при комнатной температуре / С. В. Скворцова [и др.] // Титан. 2016. № 3. С. 29–35.
- 2 Влияние дополнительного легирования нейтральными упрочняющими элементами на структуру и свойства ($\alpha+\beta$)-титанового сплава / С. В. Скворцова [и др.] // Титан. 2017. № 3. С. 32–36.